XXXII SIMPOSIO PERUANO DE FÍSICA
1er CONGRESO INTERNACIONAL DE FÍSICA
Arequipa, 17–20 de noviembre de 2026

Propiedades ópticas del aerosol sobre Arequipa (Perú) a partir de espectrorradiómetros comerciales: calibración en el sitio, cierre radiativo y atribución de la pluma volcánica

Alejandro Paxi Silva, **Alberto Montoya Portugal***, Ernesto Palo Tejada, Carlos Taco Chila, Rodrigo Joseph Quispe Andrade y Luis Angel Conde Mendoza

Departamento Académico de Física, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú
*Expositor: Alberto Montoya Portugal (lmontoyap@unsa.edu.pe) · Correspondencia: Alejandro Paxi Silva (apaxi@unsa.edu.pe)

Resumen

Arequipa (2335 m) está a 73 km del volcán Sabancaya, en erupción desde 2016, y no tiene fotómetro solar. Recuperamos el espesor óptico de aerosoles (AOD) entre 440 y 1638 nm, el exponente de Ångström y el vapor de agua (PWV) a partir de la irradiancia directa espectral de dos espectrorradiómetros comerciales (EKO MS-711 y MS-713), con calibración Langley en el sitio y corrección circunsolar basada en Mie. En 74 días de la estación seca de 2026, el AOD mediano a 500 nm es 0,055, con una incertidumbre de 0,008–0,012, como la de un fotómetro de campo. El PWV coincide con ERA5 ($r = 0{,}95$), pero CAMS sobreestima el AOD 2,2 veces. En un cierre radiativo con libRadtran, ese error casi se cancela en la irradiancia global (-1 %), pero sesga la directa y la difusa en -9 y $+47$ %; con el aerosol medido, las tres componentes quedan dentro del 1,5 %. Cuando la pluma se dirige a la ciudad, el AOD del modo fino es 2,5 veces mayor, y un modelo lagrangiano atribuye al volcán el 9 % (5–12 %) del AOD fino del periodo. Los espectrorradiómetros solares pueden aportar información del aerosol donde faltan fotómetros.

0,055
AOD mediano a 500 nm en 74 días de la estación seca

×2,2
sobreestimación del AOD por el pronóstico de CAMS

1,5 %
sesgo máximo del cierre radiativo con el aerosol medido

9 %
del AOD fino del periodo, atribuido al Sabancaya

Introducción

El AOD se mide con fotómetros solares como los de AERONET (Holben et al., 1998), pero **Arequipa no tiene ninguno**: los más cercanos están a 270–630 km. Y está a 73 km del **Sabancaya**, en erupción desde 2016, cuyo SO_2 se oxida a sulfato, un aerosol fino (Moussallam et al., 2017).

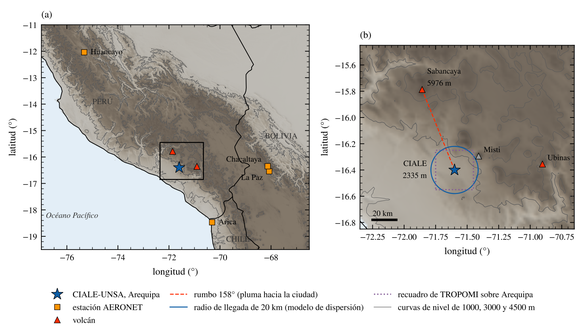


Figura 1. (a) Sur del Perú, estaciones AERONET y volcanes. (b) Entorno de la estación y rumbo del Sabancaya a ella (158°).

Objetivo: usar como fotómetros solares dos espectrorradiómetros comerciales instalados para energía solar y, con ellos, evaluar CAMS (Inness et al., 2019) y la contribución de la pluma volcánica.

Metodología

DNI espectral
MS-711 y MS-713
colimador de 5°, cada minuto
440–1638 nm

→ **Filtro de nubes**
adaptado de AERONET
contrastado con GOES-19

→ **Langley en el sitio**
V_0 por canal
30–47 rectas por canal

→ **Beer–Lambert**
se restan Rayleigh,
O_3 y NO_2 → $\tau_a(\lambda)$

→ **Corrección circunsolar**
Mie, modos fino y grueso
$\tau = \tau_{\text{medido}} + k$

→ **Productos**
AOD, Ångström α,
fracción fina; PWV (940 nm)

¿CAMS y ERA5?
AOD y PWV horarios
frente a la medida

Cierre radiativo
libRadtran: global,
directa y difusa (608 h)

Pluma volcánica
IGP, ERA5, TROPOMI
y modelo lagrangiano

Langley: $$\ln \frac{\mathrm{DNI}}{f_d} + m_R\tau_R + m_{O_3}\tau_{O_3} + m_{NO_2}\tau_{NO_2} = \ln V_0 - m_a\,\tau_a$$

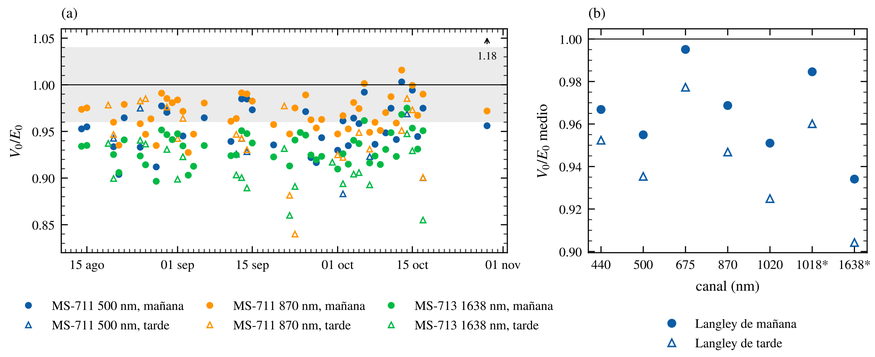


Figura 2. Calibración Langley: (a) V_0/E_0 (cociente respecto de la calibración de fábrica) de cada recta aceptada, para tres canales; la franja gris es la incertidumbre de fábrica de ± 4 %. (b) Media por canal, mañana y tarde.

Resultados

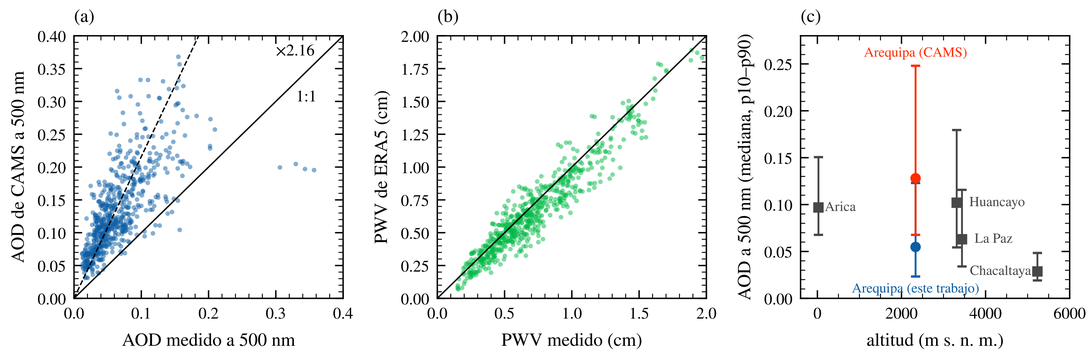


Figura 3. (a) AOD horario a 500 nm de CAMS frente al medido. (b) PWV de ERA5 frente al medido. (c) AOD a 500 nm de las estaciones AERONET cercanas y de Arequipa en función de la altitud.

- AOD mediano a 500 nm de **0,055** (p10–p90: 0,023–0,123), $\alpha = 0{,}63$ y fracción fina de 0,43: atmósfera limpia, dominada por partículas gruesas.
- ERA5 reproduce el PWV ($r = 0{,}95$); **CAMS sobreestima el AOD por 2,2**.

Análisis de resultados

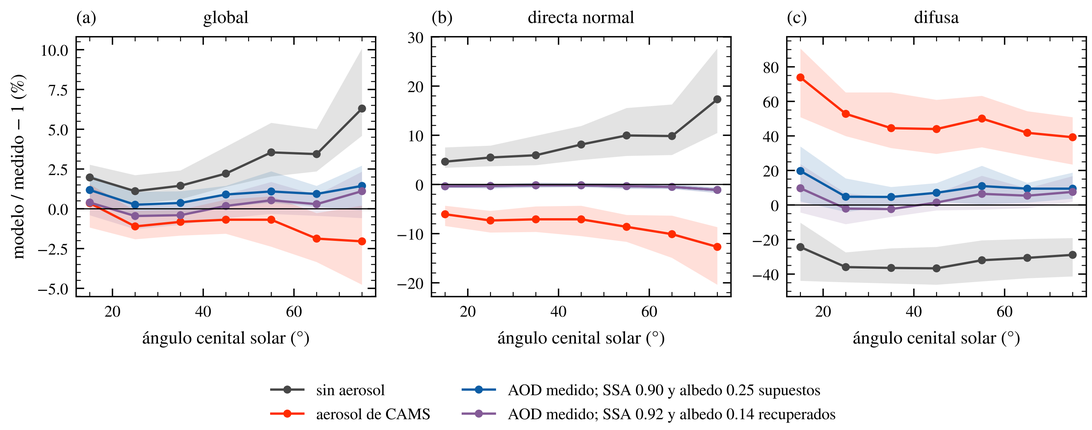


Figura 4. Error relativo de la irradiancia modelada (a) global, (b) directa normal y (c) difusa frente al ángulo cenital, para cuatro entradas de aerosol.

Cierre radiativo. Con CAMS el error casi se cancela en la global (-1 %), pero la directa queda un 9 % por debajo y la difusa un **47 %** por encima; con el aerosol medido, las tres quedan dentro del 1,5 %. La difusa acota el SSA en 0,92 (0,88–0,95).

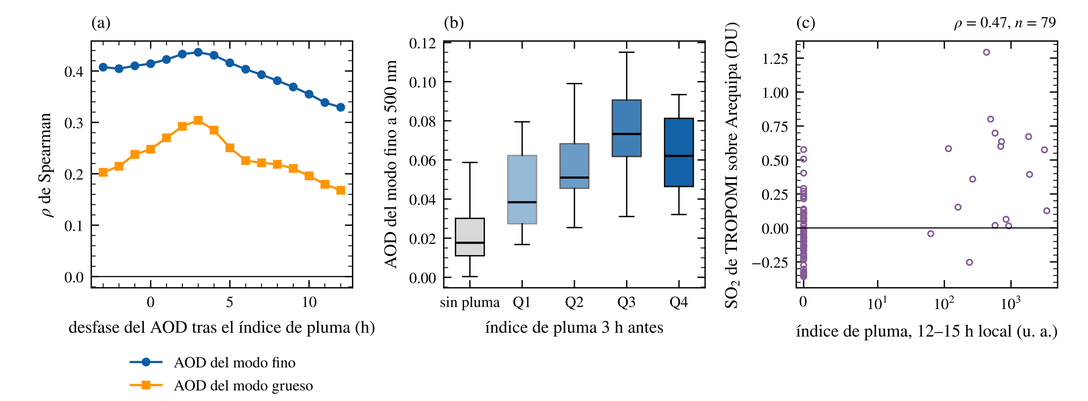


Figura 5. (a) Correlación entre el índice de pluma del modelo de dispersión y el AOD fino y grueso según el desfase. (b) AOD fino por cuartil del índice de pluma. (c) Índice de pluma frente al SO_2 de TROPOMI.

Pluma del Sabancaya. Cuando el IGP informa que la pluma va hacia la ciudad, el AOD fino es **2,5 veces** mayor y TROPOMI ve SO_2 sobre Arequipa. El modelo atribuye al volcán el **9 %** (5–12 %) del AOD fino del periodo.

Conclusiones

1. El AOD se recupera de 440 a 1638 nm con una incertidumbre de 0,008–0,012, comparable a la de un fotómetro de campo.
2. CAMS sobreestima el AOD por 2,2: el error se cancela en la global, pero sesga directa y difusa.
3. La pluma del Sabancaya es una fuente identificable de aerosol fino sobre la ciudad.
4. Los espectrorradiómetros solares pueden **aportar información del aerosol** donde no hay fotómetros.

Referencias

B. Holben et al. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1):1–16, 1998. doi: 10.1016/s0034-4257(98)00031-5.

A. Inness et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6):3515–3556, 2019. doi: 10.5194/acp-19-3515-2019.

Y. Moussallam et al. Volcanic gas emissions and degassing dynamics at Ubinas and Sabancaya volcanoes; implications for the volatile budget of the central volcanic zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 343:181–191, 2017. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.027.

Agradecimientos

Al CIALE-UNSA, por la estación espectrorradiométrica y los datos; al IGP, por sus reportes volcánicos; a las estaciones AERONET de Mount Chacaltaya, La Paz, Huancayo-IGP y Arica; y a Copernicus y la NOAA, por sus datos abiertos.